

УДК 004.75

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/23>**Гузь Д.Р.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Штіфзон О.Й.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Новіков П.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Любицький С.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА БАЗІ ІОТ ПРИСТРОЮ

В сучасних умовах спостереження за станом навколишнього середовища відіграє значну роль, особливо на фоні кліматичних змін по всій планеті. Одним із основних параметрів якості навколишнього середовища вважають чистоту повітря. У світі відоме значення AQI, індекс якості повітря, параметр, що використовується для повідомлення громадськості про рівень забруднення повітря у певний момент часу. Хоча всесвітні організації працюють над поліпшенням контролю якості повітря, українська система моніторингу якості повітря не оновлювалась десятками років і, на жаль, не може надавати актуальну в часі інформацію про стан повітря. Вдалим рішенням щодо модернізації вже наявних системи спостереження за параметрами довкілля є залучення нових технологій Інтернету речей з використанням енергоефективних Smart-сенсорів і технологій передачі даних на великій відстані. Проведено аналіз існуючих технологій для застосування в системах схожого характеру, наприклад LoRaWAN, Narrowband-IoT, Sigfox, Zigbee. Для розробки Smart-датчику застосовано RISC-V мікроконтролер ESP32 із LoRa-модемом. Спроектвана друкована плата граничного пристрою з всіма необхідними елементами: системою живлення, периферійними компонентами, засоби комунікації, датчиками. Проведено аналіз енергоспоживання в різних режимах роботи процесора. Побудована структурна схема сервера мережі LoRaWAN. Пристрій може інтегруватися в системи моніторингу, які здійснюють спостереження за віддаленими об'єктами на місцевості в умовах міста, а також і міжміській та польовій місцевостях, збирати дані про стан параметрів на об'єкті, забезпечувати надійну передачу та збереження даних, а також вчасно інформувати користувача про перебіг подій та відхилення ключових параметрів від номіналу. Передбачена можливість масштабування системи моніторингу із додаванням пристроїв у вже налаштовану мережу. Завдяки цьому можна здійснити поступовий перехід від застарілих технологій, що використовуються зараз для виконання моніторингу довкілля, скоротивши початкові капітальні витрати і заощаджуючи бюджет в довготерміновій перспективі.

Ключові слова: моніторинг навколишнього середовища, LORAWAN, ESP32, Інтернет речей, граничний пристрій, шлюз.

Постановка проблеми. В сучасних умовах спостереження за станом навколишнього середовища відіграє значну роль, особливо на фоні кліматичних змін по всій планеті. Станом на 2023 рік питання забруднення Землі звучить все частіше. Екологічна ситуація з плином часу та розвитком глобальної індустріалізації погіршується стрімкими темпами. Одним із основних параметрів

якості навколишнього середовища вважають чистоту повітря. У світі відоме значення "AQI (Air quality index)" [1], індекс якості повітря, параметр, що використовується для повідомлення громадськості про рівень забруднення повітря у певний момент часу. Збір даних з віддалених точок, розподілених по великій території, може слугувати дієвим інструментом для відстежування

та прогнозування параметрів навколишнього середовища.

В більшості європейських країн, США, Канаді, Південно-Західній Азії створені національні мережі станцій контролю атмосферного повітря в онлайн режимі. Такі станції контролюють основні забруднювачі атмосфери, які виникають у різноманітних процесах горіння в енергетиці, транспорті та промисловості: оксид вуглецю, діоксид сірки, оксиди азоту, озон, частинки пилу розміром 2,5 мкм і 10 мкм, також метеопараметри [2].

Хоча всесвітні організації працюють над поліпшенням контролю якості повітря, українська система моніторингу якості повітря не оновлювалась десятками років і, на жаль, не може надавати актуальну в часі інформацію про стан повітря, як це слід робити в умовах сучасності [3]. З огляду на осередки металургії в Україні, поширеність ТЕЦ та ТЕС, хімічних виробництв, моніторинг якості повітря навколишнього середовища є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вдалим рішенням щодо модернізації вже наявних системи спостереження за параметрами довкілля є залучення нових технологій інтернету речей з використанням енергоефективних Smart-сенсорів і технологій передачі даних на великій відстані.

Типова система моніторингу складається з:

- граничного пристрою (device + sensors) що реалізує збір інформації з сенсорів по місцю встановлення;
- шлюза обробки даних (gateway) який забезпечує маршрутизацію пакетів від серверу до пристроїв та у зворотному напрямку;
- серверної частини – мережевий сервер, що опрацьовує відправку даних від базової

станції у хмарний сервіс обробки і архівування (cloud). Користувачі системи за допомогою WEB-інтерфейсу або мобільного додатку мають доступ до хмарного сервісу через розвинений користувацький інтерфейс, де дані відображаються у вигляді графіків, діаграм, зведених таблиць тощо (dashboard).

Запропоновану систему наведено на рис. 1. На нижньому рівні працює мікроконтролерний пристрій із встановленими на ньому датчиками, що збиратиме інформацію для передачі на вищий рівень.

Сьогодні існують варіації технологій для застосування в системах схожого характеру, наприклад LoRaWAN, Narrowband-IoT, Sigfox, Zigbee та інші. Усі вони в міру схожі між собою, деякі працюють на однаковій частоті, проте реалізація протоколів різняться. Основні характеристики цих технологій порівняно на діаграмі рис. 2 [4].

NB-IoT було створено спеціально з урахуванням малопотужних стаціонарних датчиків, пропонує широкі зони покриття з глибоким проникненням у приміщеннях. Протокол підтримується основними операторами мобільного зв'язку.

На відміну від LoRaWAN, це ліцензований протокол, який, ймовірно, коштуватиме дорожче в довгостроковій перспективі, хоч і можливо забезпечить кращий загальний досвід для кінцевих користувачів [5].

На європейському ринку популярності набирає SigFox для промислових рішень, проте компанія позиціонує себе як оператор зв'язку, тому через закритість використання не слід дивитися в сторону цього протоколу в першу чергу [4].

Zigbee базується на стандарті персональної мережі IEEE 802.15.4 [6]. Тому певною мірою вважається альтернативою Wi-Fi і Bluetooth для

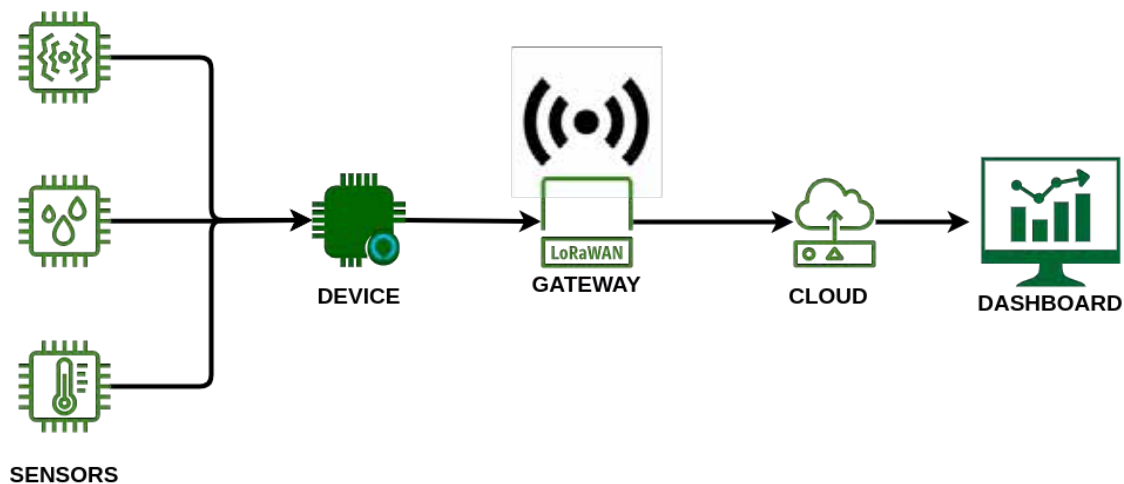


Рис. 1. Принципова схема системи моніторингу

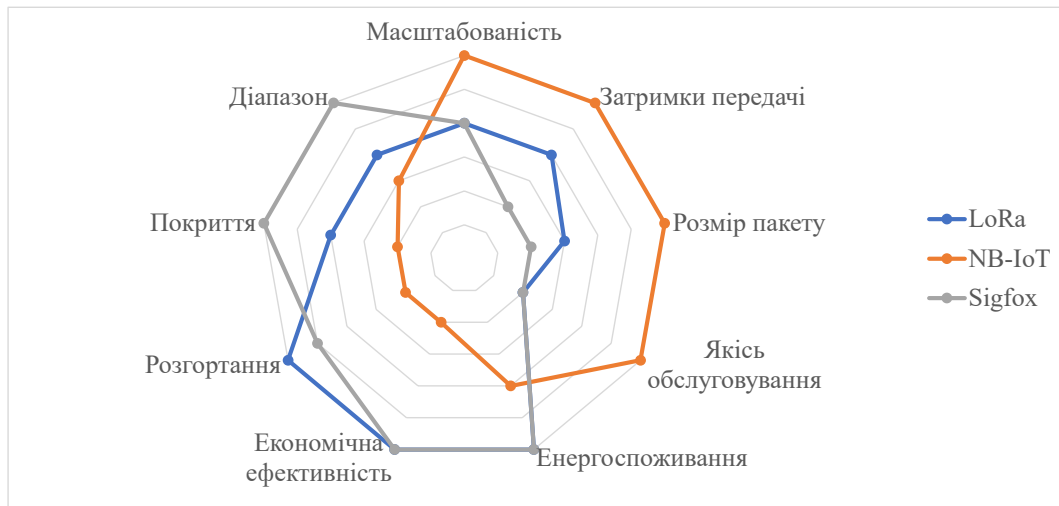


Рис. 2. Порівняння бездротових технологій комунікації

деяких застосувань, у тому числі для пристроїв з низьким споживанням енергії, які не вимагають великого енергоспоживання – наприклад, датчики розумного будинку. Проте для покриття міської площі великою мережею чи використання у польових умовах він не підходить.

Тут варто згадати перелік до двох найбільш зручних стандартів та виділити кілька пунктів:

- LoRaWAN споживає менше електроенергії порівняно з NB-IoT, що робить його більш життєздатним рішенням для проектів, які потребують вищої частоти оновлення.

- Оскільки LoRaWAN споживає менше енергії, він також забезпечує довший час роботи акумулятора порівняно з NB-IoT (15+ років порівняно з 10+ роками).

- За пропускну здатністю та покриттям обидва стандарти є рівноцінними.

- Пікова пропускну здатність для NB-IoT становить 60 Кбіт/с, що вище, ніж у LoRaWAN.

- NB-IoT є більш безпечним рішенням завдяки 256-бітному шифруванню 3GPP (у порівнянні зі 128-бітним AES для LoRaWAN).

- Затримка на NB-IoT іноді нижча, ніж на LoRaWAN. Хоча й затримка на LoRaWAN залежить від типу використовуваного пристрою та його класифікації.

- Обидва стандарти однаково підтримують геолокацію.

У випадку застосування LoRaWAN, дещо ширшим буде вибір готової продукції та компонентів, що використовуються у цьому стандарті, адже для цього не потрібне ліцензування, що й у свою чергу робить ціну доступнішою у порівнянні із NB-IoT [7].

Тому з урахуванням сказаного вище, при розробці такої системи вдалим буде застосувати недорогий та популярний RISC-V мікроконтролер ESP32 із LoRa-модемом на борту в якості граничного пристрою. Таке рішення забезпечить:

- 128-бітне шифрування при передачі даних
- Низькі енерговитрати (режими глибокого сну на боці МК)
- Порівняно низьку вартість готового пристрою
- Велику відстань передачі

Існують вже розроблені продукти схожого спрямування. Пропозиція на ринку попередніх років мала перелік пристроїв на процесорах сімейства STM32 зі схожими модулями LPWAN-технології (NB-IoT та ZigBee), які через кризу напівпровідникового виробництва є важкодоступними [8].

Традиційна топологія для LoRa мережі – зірка, коли багато кінцевих пристроїв спілкуються із одним шлюзом, а він у свою чергу забезпечує комунікацію із мережевим сервером. Частим випадком для промислових застосувань є використання кількох шлюзів обробки для покриття сигналом більшої площі. В теорії також можливий сценарій, коли навіть на малій місцевості пропускну здатності одного шлюза буде недостатньо (як правило це до 10 000 пристроїв одночасно в мережі), тоді слід збільшити кількість шлюзів у системі. Таке рішення забезпечить ширші можливості зв'язку, проте відповідно й збільшить вартість системи за рахунок додаткових шлюзових пристроїв.

Пристрій надсилає дані до шлюзу передачі даних (gateway) на частоті 868 МГц, що має доступ до мережі Інтернет. Як правило, задля кращої швидкодії шлюз підключений через Ethernet

інтерфейс, якщо це дозволяє місце його використання. Проте якщо розташування його не передбачає такої можливості, то більшість сучасних шлюзів мають можливість підключення до Інтернету через стільникову мережу 3G/LTE [9]. Сьогодні в Україні найбільші оператори мобільного зв'язку також пропонують вигідні тарифи для Smart-девайсів, що робить такий спосіб підключення зручним.

Розробка апаратної частини граничного пристрою

Для мікроконтролера на базі процесора ESP32 як джерело живлення застосовується літій-іонний акумулятор та сонячна панель, що в більшу частину року даватиме хороші результати автономності, з огляду на те, що в основному контролер працюватиме в режимі глибокого сну і «прокидатиметься» для опитування датчиків та відправки пакету даних [10]. В якості модуля передавача даних 868 МГц із підтримкою протоколу LoRa обрано Semtech SX1278 як один із надійних, широкоживаних і доступних. Що ж до датчиків температури, вологості та якості повітря, то зазвичай для бюджетних «домашніх» рішень застосовують датчик температури та відносної вологості повітря DHT11/22, AM2032 датчик якості повітря MQ-135 або ж їх аналоги. Та за можливості краще було б обрати багатофункціональний і надійний датчик Bosch BME680, що має можливість вимірювання температури, відносної вологості, барометричного тиску, широкого спектру газів та летючих органічних сполук, що великою мірою впливають на AQI.

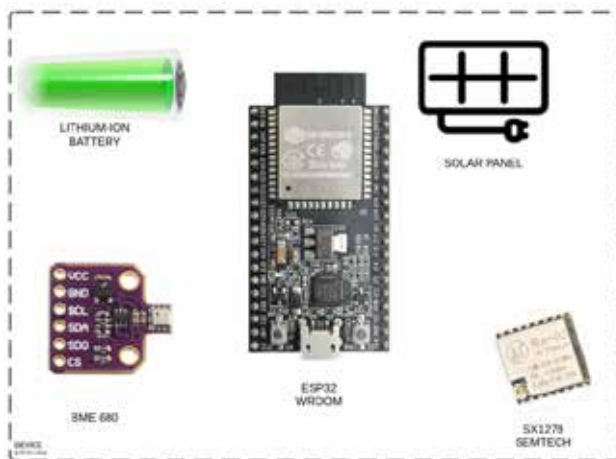


Рис. 3. Компоненти Smart-датчику вимірювання стану навколишнього середовища

Модуль розробника монтується у дві 15-контактні колодки, що можуть бути розташовані на друкованій платі. LoRa модуль має антенний вихід,

до якого підключена SMA-антена 868 МГц через зручний конектор. Для підтримання роботи такої системи в умовах відсутності мережевого струму обрано збірку із двох акумуляторних батарей типорозміру 18650 з напругою 3.7 В. Основний спосіб живлення схеми – мережеве підключення по місцю, але також передбачається резервне підживлення батарей посередництвом дообладнання монокристалічною сонячною панеллю 1...5 Вт, що пасуватиме до розмірів корпусу готового пристрою. В таблиці 1 наведені характеристики режимів енергоспоживання мікроконтролера [11]. У звичайному режимі Active Mode споживання струму при роботі становить 160 ... 260 мА, а в окремих випадках досягає 790 мА. Застосовуючи режим «глибокого сну» (Deep Sleep) можна забезпечити 16-70 кратне заощадження споживаної енергії. В режимі глибокого сну активними залишаються лише годинник реального часу та низькопотужний сопроцесор плати мікроконтролера.

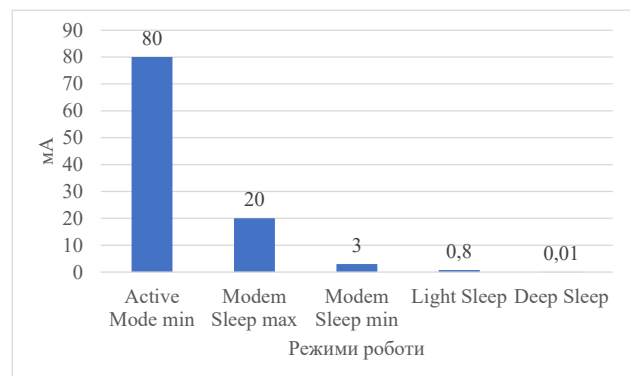


Рис. 4. Енергоспоживання плати Smart-датчику при різних режимах роботи

Багатофункціональний сенсор BME680 Bosch підключений через I2C інтерфейс, по якому відбувається шляхом отримання параметрів опитування його за адресою, якими оперує система в подальшому на інших рівнях. На рис. 5 показана спроектована друкована плата граничного пристрою, де:

1. Сенсор BME680
2. RF-модуль LoRa SX1278
3. SMA вивідна антена
4. Модуль заряду TP4056
5. Корпус для акумуляторів типорозміру 18650

Розробка програмної частини

Як платформу для розгортання серверного back-end для LoRa-мережі, запропоновано обрати ChirpStack.

ChirpStack – це мережевий сервер LoRaWAN з відкритим кодом, який можна використовувати для налаштування мереж LoRaWAN. ChirpStack

Характеристики режимів споживання електроенергії

Компонент плати	Режим роботи			
	Active mode	Modem Sleep	Light Sleep	Deep Sleep
Процесор ESP32	–	–	–	-
Низькопотужний сопроцесор	–	–	–	–
Годинник реального часу	–	–	–	–
Wifi	–	-	-	-
Bluetooth	–	-	-	-
Радіоканал	–	-	-	-
Живлення периферії	–	-	-	-
Загальне енерго-споживання	80-260 мА	3-20 мА	0.8 мА	10 мкА

надає веб-інтерфейс для керування шлюзами, пристроями, а також для налаштування інтеграції даних із основними хмарними (cloud) провайдерами, базами даних і службами, які зазвичай використовуються для обробки даних пристроїв. ChirpStack надає API (Application Programming Interface – прикладний програмний інтерфейс для взаємодії із функціоналом) на основі gRPC, який можна використовувати для інтеграції чи розширення ChirpStack.

gRPC – це сучасна високопродуктивна платформа Remote Procedure Call (RPC) з відкритим кодом, яка може працювати в будь-якому середовищі. Вона може ефективно підключати служби в центрах обробки даних і з їх допомогою підключається підтримка для балансування навантаження, трасування, перевірки працездатності та автентифікації. Він також застосовний в останньому етапі розподілених обчислень для підключення пристроїв, мобільних програм і браузерів до серверних служб.

Структура схема сервера мережі LoRaWAN представлена на рис. 7.

Gateway Bridge – певний міст між програмою Packet Forwarder, встановленою на базовій станції (шлюзі) і безпосередньо структурою сервера LoRaWAN;

Мережевий сервер – мережевий сервер, що обробляє повідомлення мережевого рівня;

Application Server – сервер додатків, що забезпечує роботу мережі на рівні користувача, здійснює інтеграцію із зовнішніми платформами.

Допоміжні складники:

MQTT Broker Mosquitto – для внутрішнього обміну повідомленнями між компонентами сервера;

Redis - проміжна база даних для зберігання швидкоплинних даних;

PostgreSQL – база даних для постійного зберігання даних. Усе використане ПЗ має ліцензію з відкритим вихідним кодом.

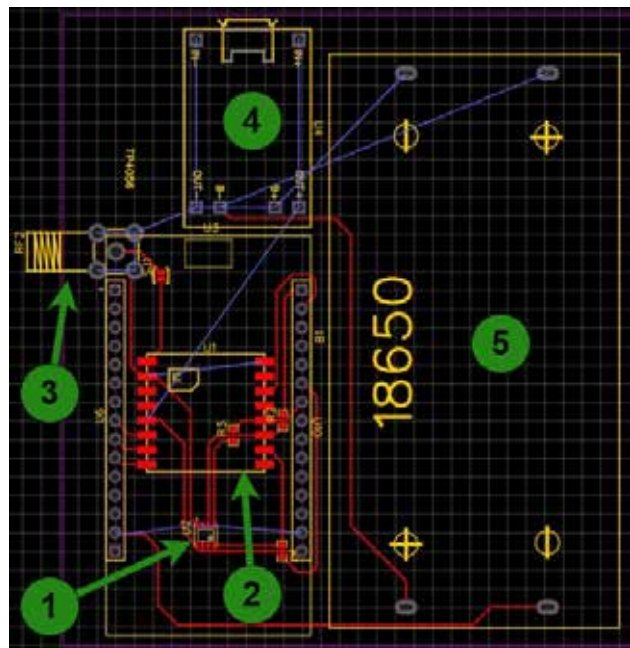


Рис. 5. Схема компонентів друкованої плати

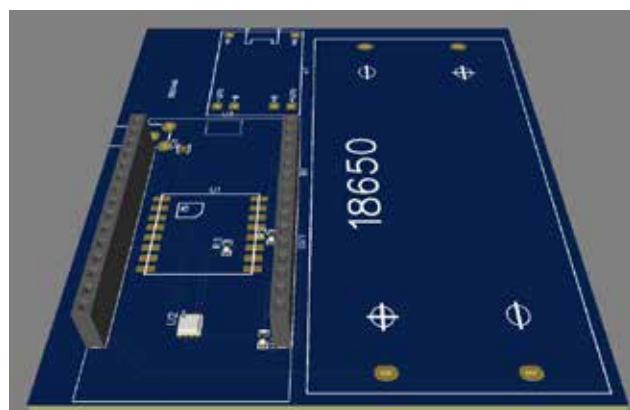


Рис. 6. Відображення друкованої плати в об'ємі

Середовище розробки програмного забезпечення Arduino IDE підтримує плати з мікропроцесорами ESP32 [12]. Це дає можливість швидкого старту розробки прототипів рішень із порівняно низьким порогом входу. Водночас це відкриває

можливості застосування багатьох бібліотек для безлічі інтерфейсів і протоколів, що, як правило, підтримуються спільнотою розробників.

В робочому циклі програми пристрій після ініціалізації інтерфейсів опитує сенсор, відправляє дані на сервер та відправляється у deep-sleep режим, споживаючи мінімум струму до наступного виходу в ефір.

Мікроконтролер публікує свої вимірювання на MQTT брокер (рис. 8).

Mqtt-in вузли “monitoring-esp32/...” спрямовують повідомлення із брокера у потік, де вони опрацьовуватимуться (рис. 9). Створено 4 графіки, що відображають вхідні параметри: Temperature Chart (графік температури), Pressure Chart (графік тиску), Humidity Chart (графік вологості), Gas Resistance Chart (графік) (рис. 10).

Дані із графіків архівуються в текстові файли у json-форматі в локальне сховище пристрою, на якому працює Node-RED.

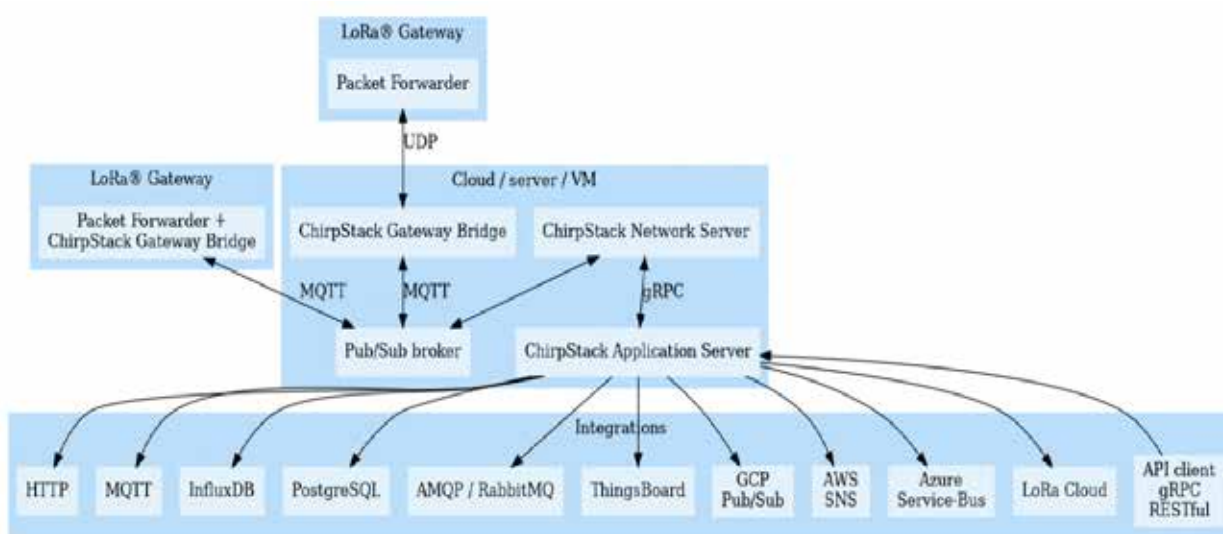


Рис. 7. Структура схема сервера мережі LoRaWAN

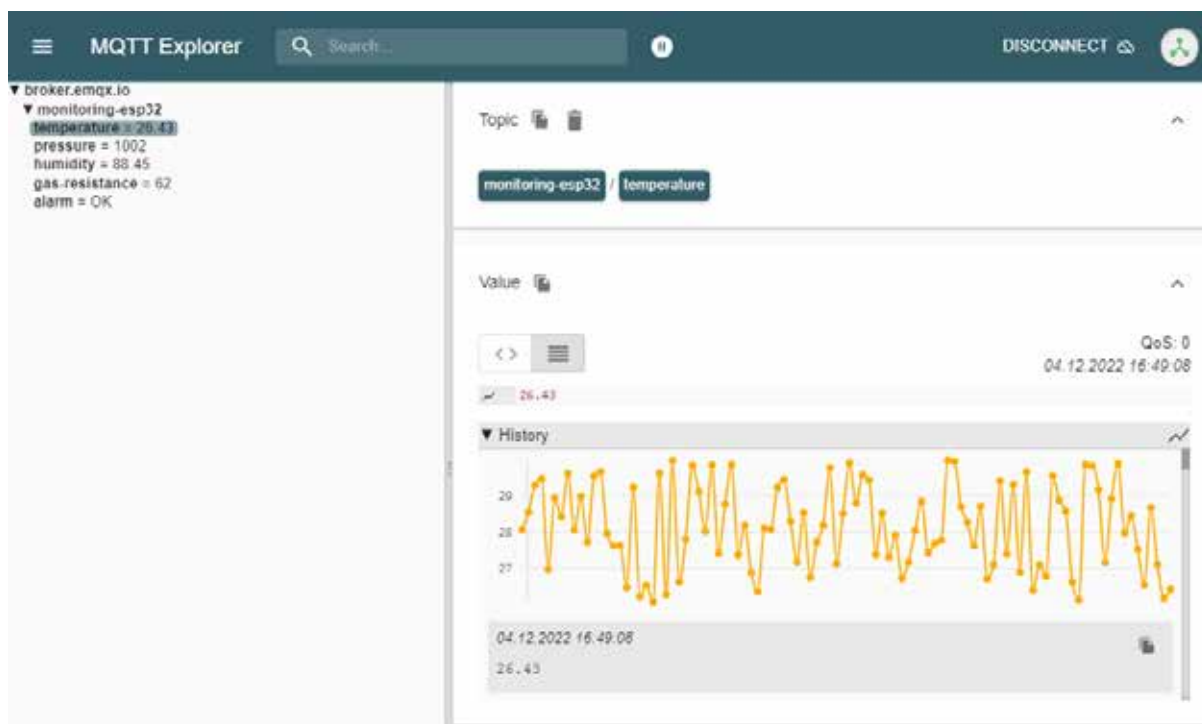


Рис. 8. Отримані із пристрою дані топіку температури “temperature”

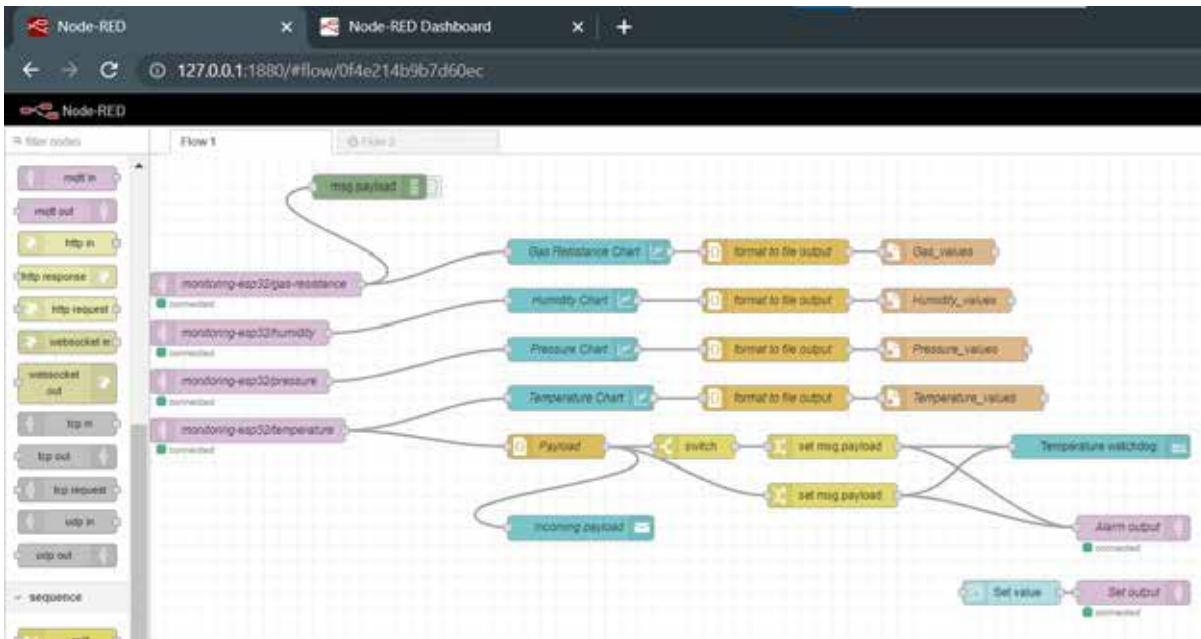


Рис. 9. Потоки для значень параметрів

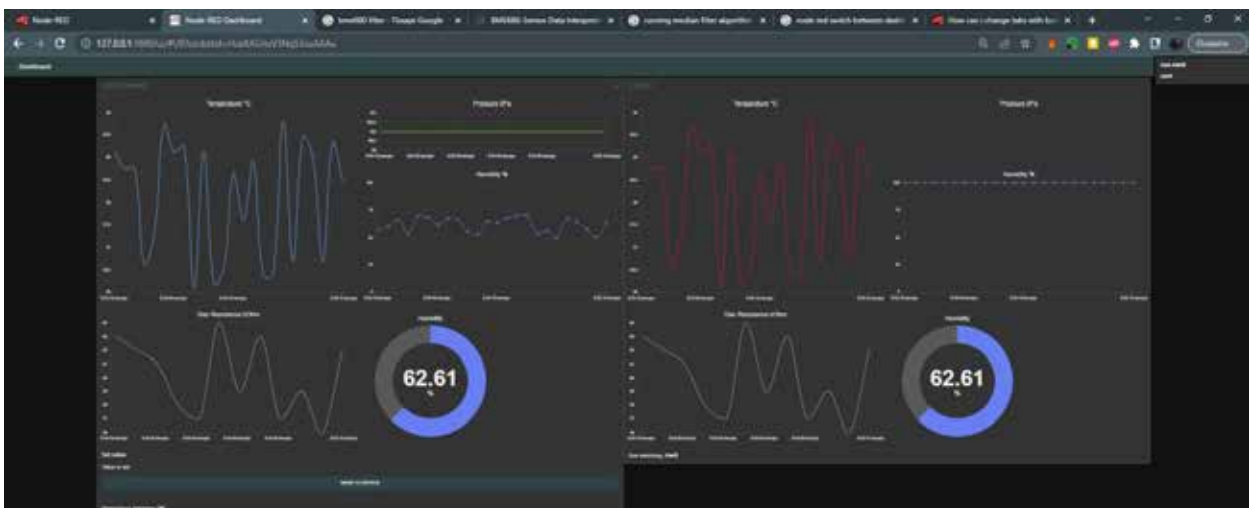


Рис. 10. Панель відображення (Dashboard) пристроїв системи моніторингу

При масштабованій системі моніторингу пристрої відображаються в форматі послідовного списку, коли кожен із них можна згорнути. Сповіщення про події в панель оператора надходять також в порядку черги, рис. 10.

Висновки

Ефективність роботи системи моніторингу стану навколишнього середовища ґрунтується на надійних, мобільних, гнучких в застосуванні і енергоефективних кінцевих пристроях. В сучасних умовах такі пристрої повинні бути оснащені енергоефективними мікропроцесорами, засобами бездротової комунікації, широким набором інтерфейсів для підключення периферійних пристроїв, мати можливість гнучкого конфігурування та програмування.

Розроблений пристрій системи моніторингу стану навколишнього середовища складається із загально доступних компонентів. Низьке енергоспоживання дозволяє зменшити витрати на заміну елементів живлення і на їх обслуговування. Програмне забезпечення розроблене за допомогою відкритих засобів і бібліотек.

Для комунікації пристроїв з шлюзом передачі даних застосовано технологію LoRa. Це дозволяє здійснювати комунікацію між пристроями на великих відстанях, при цьому забезпечувати понижене енергоспоживання. Передача даних здійснюється за відкритим протоколом MQTT.

Пристрій може інтегруватися в системи моніторингу, які здійснюють спостереження за відда-

леними об'єктами на місцевості в умовах міста, а також і міжміській та польовій місцевостях, збирати дані про стан параметрів на об'єкті, забезпечувати надійну передачу та збереження даних, а також вчасно інформувати користувача про перебіг подій та відхилення ключових параметрів від номіналу.

Важливо зауважити на можливості масштабування системи моніторингу із додаванням пристроїв у вже налаштовану мережу. Завдяки цьому можна здійснити поступовий перехід від застарілих технологій, що використовуються зараз для виконання моніторингу довкілля, скоротивши початкові капітальні витрати і заощаджуючи бюджет в довготерміновій перспективі.

Список літератури:

1. Suman. (2021) Air quality indices: A review of methods to interpret air quality status. *Materials Today: Proceedings*. Volume 34, Part 3, p. 863-868. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.141>
2. ДСТУ ISO 8756:2008 Якість повітря. Оброблення даних за температурою, тиском та відносною вологістю (ISO 8756:1994, IDT).
3. «Створення ефективної системи моніторингу довкілля в Україні: проблеми і шляхи їх вирішення». Аналітична записка <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/stvorennya-efektivnoi-sistemi-monitoringu-dovkillya-v-ukraini>
4. «Sigfox. LoRa. NB-IoT. Easy guide to who does it best» 2018, [Електронний ресурс] - <https://www.iotsolutions.com/mt/post/sigfox-vs-lora-vs-nb-iot-who-s-doing-it-best>
5. Muteba, K.F., Djouani, K., Olwal, T. (2022). 5G NB-IoT: Design, Considerations, Solutions and Challenges. *Procedia Computer Science*. Volume 198, p. 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.214>
6. Anthony S. Deese, Julian Daum. (2018). Application of ZigBee-Based Internet of Things Technology to Demand Response in Smart Grids. *IFAC-PapersOnLine*. Volume 51, Issue 28. p. 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.675>
7. Technical Overview of LoRa and LoRaWAN, TÜV Rheinland, 2015.
8. Світовий дефіцит мікрочипів у розпалі: як зростають ціни на техніку та авто. Українська правда. <https://www.epravda.com.ua/publications/2021/07/12/675833/>
9. Integration of LoRaWAN and 4G/5G for the Industrial Internet of Things, IEEE Communications Magazine 2018.
10. Semtech “LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview” Technical Paper, 2020, Режим доступу: https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf
11. Insight Into ESP32 Sleep Modes & Their Power Consumption. Last minute engineers. <https://lastminuteengineers.com/esp32-sleep-modes-power-consumption/>
12. Neil Kolban “Kolban's Book on ESP32” 2018

Huz D.R., Shtifzon O.Yo., Novikov P.V., Liubyt'skyi S.V. ENVIRONMENTAL CONDITION MONITORING SYSTEM BASED ON IOT DEVICE

In modern conditions, monitoring the state of the environment plays a significant role, especially against the background of climate changes throughout the planet. Air purity is considered one of the main parameters of environmental quality. The world is known for AQI, Air Quality Index, a parameter used to inform the public about the level of air pollution at a given time. Although international organizations are working to improve air quality control, the Ukrainian air quality monitoring system has not been updated for decades and, unfortunately, cannot provide up-to-date information on air conditions. A successful solution for the modernization of existing systems for monitoring environmental parameters is the involvement of new Internet of Things technologies using energy-efficient Smart sensors and long-distance data transmission technologies. An analysis of existing technologies for use in systems of a similar nature, such as LoRaWAN, Narrowband-IoT, Sigfox, Zigbee, was carried out. A RISC-V ESP32 microcontroller with an on-board LoRa modem as a boundary device was used to develop the Smart sensor. The printed circuit board of the boundary device is designed with all the necessary elements: power system, peripheral components, means of communication, sensors. An analysis of energy consumption in different processor operating modes was carried out. The structural diagram of the LoRaWAN network server is built. The device can be integrated into monitoring systems that monitor remote objects on the ground in city conditions, as well as in intercity and field areas, collect data on the state of parameters at the object, ensure reliable data transmission and storage, and also provide timely information the user about the course of events and the deviation of key parameters from the nominal value. It is important to note the possibility of scaling the monitoring system by adding devices to an already configured network. This allows for a gradual transition from the outdated technologies currently used to perform environmental monitoring, reducing initial capital costs and saving the budget in the long term.

Key words: environmental monitoring, LORAWAN, ESP32, Internet of Things, edge device, gateway.